

WYKORZYSTANIE DANYCH ZE SKANINGU LASEROWEGO DO POMIARU ZMIAN ZASIĘGU ORAZ STRUKTURY PIONOWEJ ROŚLINNOŚCI SEMI-NATURALNEGO ODCINKA DOLINY WISŁY

Agnieszka Gajda

Application of laser scanning data in the analysis of the changes in vegetation vertical structure and changes in a semi-natural section of the Vistula valley

Abstract: Changes in vegetation cover are one of the features affecting the functioning of river valleys. Vegetation influences the geomorphological and hydrological processes within a water basin. Controlling the quality and quantity of vegetation is crucial for keeping the eco- and geosystem balance. Until now the methods applied in controlling vegetation were not efficient (field work) or were not providing enough information about the vertical structure of plant communities (i.e. analyses based on data obtained from optical remote sensing do not allow precise determination of vegetation height). The aim of this study was to determine the changes in the extent and vertical structure of the vegetation within a semi-natural section of the Vistula river valley in Krakow between 2006 and 2012 using airborne laser scanning. The application of such data in this type of research was also evaluated. The study revealed that, in spite of spite of maintenance work, the extent of vegetation cover increased during the monitoring period. Data verification indicated high precision and suitability of these data in the determination of the vegetation cover changes at the local scale. A wider access to data obtained from airborne laser scanning should soon result in the proliferation of studies conducted using airborne laser scanning which will positively impact the cost and quality of such research.

Keywords: LiDAR, vegetation extent changes, vertical structure of vegetation

Zarys treści: Zmiany zasięgu roślinności są jedną z cech wpływających na funkcjonowanie dolin rzecznych. Roślinność ma tu duży wpływ na procesy przebiegające w obrębie doliny i koryta rzeki. Kontrola ilości oraz jakości roślinności ma podstawowe znaczenie dla utrzymania równowagi eko- i geosystemu. Dotychczasowe metody stosowane do kontroli roślinności są bardzo pracochłonne (praca w terenie) lub nie dostarczają pełnej informacji na temat struktury pionowej zbiorowisk roślinnych (np. opracowania wykonywane na podstawie optycznych danych teledetekcyjnych nie pozwalają dokładnie ocenić wysokości roślinności). Celem badań było określenie zmian zasięgu i struktury pionowej roślinności w obrębie seminaturalnego odcinka doliny Wisły w Krakowie w latach 2006–2012 z wykorzystaniem danych z lotniczego skaningu laserowego. Dodatkowym celem metodycznym pracy była ocena przydatności tych danych do tego typu badań. Stwierdzono, że pomimo prowadzonych prac pielęgnacyjnych zasięg roślinności zwiększył się w badanym okresie. Jednocześnie udział poszczególnych klas wysokości nie uległ zmianie. Weryfikacja wyników wykazała wysoką dokładność i przydatność wykorzystanych danych do określania zmian szaty roślinnej w skali lokalnej. Coraz szerszy dostęp do danych z lotniczego skaningu laserowego powinien w najbliższym czasie spowodować rozpowszechnienie analiz zmian prowadzonych na podstawie danych z lotniczego skaningu laserowego, co pozytywnie wpłynie na koszt i jakość prowadzonych badań.

Słowa kluczowe: LiDAR, zmiany zasięgu roślinności, struktura pionowa roślinności

Wstęp

Zmiany pokrycia roślinnością są nieodłączną cechą funkcjonowania dolin rzecznych. Wysoka roślinność (drzewa) nie ma znaczącego wpływu na przebieg wezbrania, o ile jej powierzchnia w przekroju nie przekracza wartości progowych wynoszących ok. 10% powierzchni przekroju poprzecznego doliny (Gippel i in. 1996). Odpowiednio utrzymana roślinność ma duże znaczenie w ochronie przeciwpowodziowej. W związku z ingerencją człowieka w większość ekosystemów dolin rzek zaszły zmiany, co powoduje nadmierne zarastanie łożyska wielkiej wody (*Zagrożenia dla bioróżnorodności...* 2013). Może to powodować spiętrzanie wody w czasie wezbrań i niekorzystny rozkład prądów. Właśnie dlatego na takich obszarach powinno się prowadzić monitoring rozwoju i sukcesji roślinności (Gippel i in. 1996).

Badania roślinności nadbrzeżnej (ang. *riparian vegetation*) stanowią ważny element badań ekosystemów dolin rzecznych. Dotyczą one zarówno zasięgu roślinności (Cebecauerova i in. 2012), jej składu gatunkowego i rozmieszczenia gatunków (Omelchuk i in. 2012), jak i wpływu różnych czynników, np. kłód, na rozwój roślinności nadbrzeżnej (Gippel i in. 1996, Rzepecka i in. 2012). W wielu pracach omawiany jest również wpływ roślinności na procesy geomorfologiczne zachodzące w strefie przybrzeżnej i dolinie rzecznej (Gurnell 1997; Lehotský, Gresková 2004). Blisko związane z tematem opracowania są prace poruszające wpływ zabudowy biologicznej den dolin na zagrożenie powodziowe (Gippel i in. 1996; Wyżga, Radecki-Pawlik 2011).

Teledetekcja ma szerokie zastosowanie w badaniach roślinności porastającej zarówno brzegi, jak i koryta rzek. Może być ona wsparciem dla tradycyjnych metod terenowych (Fremier, Talley 2009). Bardzo dobre rezultaty w badaniach roślinności daje wykorzystanie danych LiDAR (ang. *Light Detection and Ranging*). Dane ze skaningu laserowego mogą być wykorzystywane wraz ze zobrazeniami satelitarnymi lub lotniczymi (Hurtt i in. 2003; Arroyo i in. 2010; Johansen i in. 2010; Blaschke i in. 2011). Wyższa niż w przypadku większości danych optycznych rozdzielczość przestrzenna danych LiDAR wprowadziła możliwość zwiększenia dokładności analiz, np. indywidualnych koron drzew i wąskich pasów roślinności (Hurtt i in. 2003). Zastosowania mogą być szerokie – od określania typów pokrycia terenu i wydzielania klas roślinności nadbrzeżnej (Arroyo i in. 2010) przez kartowanie samej roślinności porastającej najbliższą okolicę cieków wodnych (Johansen i in. 2010). Częstym zabiegiem przy łączeniu danych optycznych i ze skaningu laserowego jest metoda analizy obiektowej (Antonarakis i in. 2008; Blaschke i in. 2011).

Wraz z rozwojem lotniczego skaningu laserowego oraz ze wzrostem mocy obliczeniowej komputerów w ostatnich latach nastąpił gwałtowny wzrost zastosowania danych laserowych w badaniach środowiska przyrodniczego. Dane LiDAR mają szerokie zastosowanie w badaniach roślinności (Naesset 1997; Lefsky i in. 2002; Wężyk 2006; Zawila-Niedźwiecki i in. 2008; Tonolli i in. 2010; Vauhkonen i in. 2010; Stereńczak, Zasada 2011). Jednym z pierwszych zastosowań danych LiDAR w badaniach roślinności było zastosowanie ich do określania cech taksacyjnych drzewostanów, przy czym początkowe badania opierały się na pomiarach wysokości (Aldred, Bonnor 1985), a następnie szacowanie zasobności drzewostanu (Naesset 1997). Wraz z upływem czasu określanie cech taksacyjnych oraz zasobności stało się jednym z bardziej popularnych zastosowań skaningu w badaniach roślinności (Będkowski, Mikrut 2006; Tonolli i in. 2010; Wężyk i in. 2010). Dane LiDAR są również szeroko stosowane do klasyfikacji pokrycia terenu (Brennan, Webster 2006; Antonarakis i in. 2008).

W skali Polski Kraków jest pionierem w pozyskiwaniu i wykorzystywaniu danych ze skaningu laserowego. Pierwszy nalot odbył się w 2004 r. i zasięgiem objął jedynie nieduży fragment miasta w okolicy Wawelu. Był to drugi w Polsce projekt związany z technologią LiDAR w planowaniu przestrzennym. Kolejny nalot został wykonany w 2006 r. na zlecenie Urzędu Miasta Krakowa (Jędrychowski 2007), obejmując całe miasto w granicach administracyjnych. Dzisiaj, dzięki współczesnym danym pochodzącym z programu ISOK (Informatyczny System Osłony Kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami), Kraków jako jedno z nielicznych miast w Polsce posiada więcej niż jeden pełny zestaw danych z lotniczego skaningu laserowego.

Analiza materiałów historycznych oraz współczesnych obserwacji hydrologicznych jednoznacznie wskazuje na poważne zagrożenie Krakowa klęską powodzi (*Lokalny plan...* 2000). Powódzie w Krakowie są wzmiankowane w kronikach od wczesnego średniowiecza (pierwsza opisana powódź miała miejsce w 988 r.) (Pociask-Karteczka

1994). Od roku 1813, kiedy doszło do największego do tej pory wylewu Wisły, są prowadzone stałe obserwacje wody w Krakowie (Pociask-Karteczka 1994; *Lokalny plan...* 2000). Ostatnia wielka powódź wystąpiła w 2010 r. Jej bezpośrednim skutkiem było sformułowanie działań mających na celu usprawnienie działania planu ograniczania skutków powodzi i profilaktyki powodziowej dla Krakowa. Zostały w nich wymienione prace oraz przedsięwzięcia obejmujące również wycinkę drzew i krzewów mających wpływ na zmniejszanie przepustowości cieków (Wojciechowski 2010).

W świetle powyższych faktów uzasadnione jest podjęcie tematyki monitoringu rozwoju roślinności w międzywalu Wisły w Krakowie.

Szerokie możliwości analizy z wykorzystaniem skaningu laserowego oraz istnienie zestawu danych umożliwiających śledzenie zmian w czasie przyczyniły się do podjęcia badań nad możliwością stosowania lotniczego skaningu laserowego w badaniu zmian zasięgu roślinności oraz zmian zachodzących w latach 2006–2012 w międzywalu Wisły w Krakowie.

Obszar badań

Obszar badań to fragment seminaturalnego odcinka doliny Wisły. Znajduje się on w zachodniej części miasta Krakowa (dzielnica VIII Dębniki) na obszarze Biełańsko-Tynieckiego Parku Krajobrazowego i ma powierzchnię 1,1 km² (0,83 km² bez uwzględnienia rzeki, ryc. 1). Obszar poddany analizie objął międzywale ograniczone z obu stron podstawą wałów przeciwpowodziowych. Spora jego część



Ryc. 1. Położenie obszaru badań
Fig 1. Location of the study area

jest porośnięta przez las łąkowy (fot. 1), a w składzie gatunkowym dominują topola czarna, wierzba biała i wierzba krucha. Na niższe warstwy składają się różnego rodzaju krzewy (*Siedliska przyrodnicze dolin...* 2013) oraz roślinność trawiasta i inne gatunki jednoroczne ulegające sezonowym zmianom (Kaszyński, Szczukowska 2012).

Charakterystyka danych

W przedstawionych w pracy badaniach wykorzystano dane z lotniczego skaningu laserowego pozyskane podczas nalołów w 2006 i 2012 r.

Starszy zestaw danych (ryc. 2) został udostępniony przez Biuro Planowania Przestrzennego Urzędu Miasta Krakowa. W wyniku nalołu w listopadzie 2006 r. pozyskano chmurę punktów o średniej gęstości co najmniej 12 pkt/m² (Jędrzychowski 2007), przy czym dla analizowanego obszaru gęstość wynosiła około 16 pkt/m². Dane zostały udostępnione w formie nieprzetworzonej (nieprzefiltrowane, niesklasyfikowane, ryc. 2). Stan wody w Wiśle nie wpłynął na zakłócenie obrazu roślinności – w profilu Kraków-Bielany w listopadzie 2006 r. kształtował się przez zdecydowaną większość miesiąca w zakresie stanów średnich (*Biuletyn Państwowej Służby...* 2006).

Nowsze dane pochodziły z projektu ISOK. Zostały one pozyskane w lipcu 2012 r. Podobnie jak w 2006 r., stan wody w Wiśle nie wpłynął na obraz roślinności – w profilu Kraków-Bielany w lipcu 2012 r. stan Wisły kształtował się w zakresie stanów średnich (*Biuletyn Państwowej Służby...* 2012). Otrzymana chmura punktów ma nominalną gęstość 12 pkt/m² (*Projekt ISOK* 2013). Dane są przefiltrowane i sklasyfikowane (ryc. 3). Klasy punktów są zgodne ze standardem formatu zapisu chmury punktów LAS (*Numeryczne Dane Wysokościowe* 2013):

- 1) punkty przetwarzane, ale niesklasyfikowane,
- 2) punkty leżące na gruncie,
- 3) punkty reprezentujące niską roślinność tj. w zakresie 0–0,40 m,
- 4) punkty reprezentujące średnią roślinność, tj. w zakresie 0,40–2,00 m,
- 5) punkty reprezentujące wysoką roślinność, tj. w zakresie powyżej 2,00 m,
- 6) punkty reprezentujące budynki, budowle oraz obiekty inżynierskie,
- 7) szum,
- 8) punkty reprezentujące wody powierzchniowe.

Pochodzenie danych z różnych pór roku nie zostało uznane za czynnik dyskwalifikujący. Obserwacje prowadzone na obszarze badań podczas sezonu wegetacyjnego nie wykazały istotnych zmian w wysokości roślinności wynikających z obecności bądź braku ulistnienia.

Metody

Przed przystąpieniem do analizy dane wymagały odpowiedniego przygotowania. Do wstępnej obróbki, jak i późniejszej klasyfikacji chmury punktów, wykorzystano oprogramowanie LasTools (*Rapidlasso GmbH* 2013) oraz ArcMap 10.1 (*ArcGIS for Desktop* 2013). Konwersja chmur punktów do modeli rastrowych oraz późniejsza

analiza i weryfikacja zostały przeprowadzone w programach QGIS Dufour (*QGIS* 2013) i ArcMap 10.1 (*ArcGIS for Desktop* 2013).

Przetworzenie danych z 2006 r.

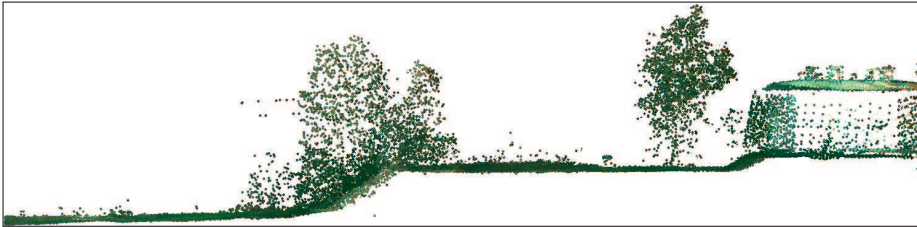
Pierwszym krokiem była konwersja do formatu LAS, a następnie filtracja szumu (Heritage, Large 2009). Usunięto punkty mające mniej niż 5 sąsiadujących punktów we wszystkich sąsiadujących sześciangach (blok $3 \times 3 \times 3$ sześciangi) o boku 2 m. Operacja ta pozwoliła na wyeliminowanie punktów niemających związku z innymi. Obecność tych punktów jest związana z fałszywymi odbiciami, np. od pyłów, kropli deszczu (Heritage, Large 2009). Kolejnym krokiem było wyznaczenie klasy „grunt” z użyciem domyślnego zestawu ustawień „nature” modułu LasGround z pakietu LasTools. Następnie chmura punktów została sklasyfikowana według wysokości ponad poziom gruntu zgodnie ze standardem określonym w formacie LAS przyjętym w projekcie ISOK, z modyfikacją przesuwającą granicę między niską a średnią roślinnością na 0,5 m (McIntyre i in. 2010). W związku z docięciem chmury punktów do granicy obszaru ograniczonego podstawą wałów przeciwpowodziowych poza kładką technologiczną (rurociąg ciepłowniczy) i słupami (oświetlenie i elektryczność) na obszarze tym nie ma innych obiektów antropogenicznych. Ich usunięcie wymagało niewielkiej manualnej korekty klasyfikacji. Została ona przeprowadzona na przekrojach chmury punktów w programie ArcMap. Sklasyfikowaną chmurę punktów znormalizowano względem gruntu, a następnie odfiltrowano zbędne obiekty oraz punkty reprezentujące klasę wody, pozostawiając jedynie grunt i trzy klasy roślinności.

Dane z 2012 r.

Dane projektu ISOK zostały dostarczone w formie przetworzonej. Kontrola klasyfikacji wykazała jednak wiele błędów, np. samochody, słupy oraz pionowe ściany rurociągu sklasyfikowane jako roślinność (ryc. 4). W związku z tym przeprowadzono ręczne korekty, po których usunięto zbędne klasy. Porównanie wysokości bezwzględnych wykazało spore rozbieżności wysokości między modelami. W związku z większą gęstością punktów oraz porą nalotu (listopad) jako dokładniejsze do modelowania powierzchni terenu wybrano dane z 2006 r. Punkty leżące na gruncie zostały usunięte z analizowanej chmury punktów, a w ich miejsce zostały wstawione punkty leżące na gruncie z danych z 2006 r. Po scaleniu punkty reprezentujące trzy klasy roślinności z 2012 r. oraz klasa gruntu z 2006 r. zostały ponownie sklasyfikowane i znormalizowane względem nowej powierzchni odniesienia.



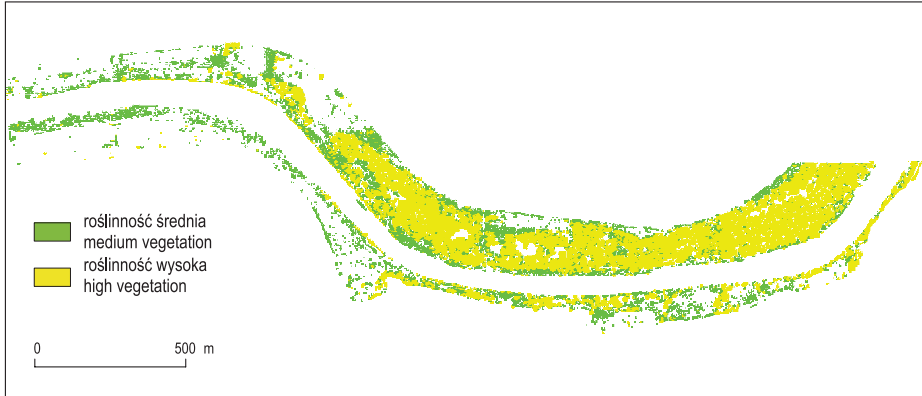
Fot. 1. Przykład roślinności występującej na obszarze badań (fot. A. Gajda)
Photo 1. Typical vegetation in the study area (photo by A. Gajda)



Ryc. 2. Przykład danych ze skaningu laserowego z 2006 r.
Fig. 2. Example of data from 2006

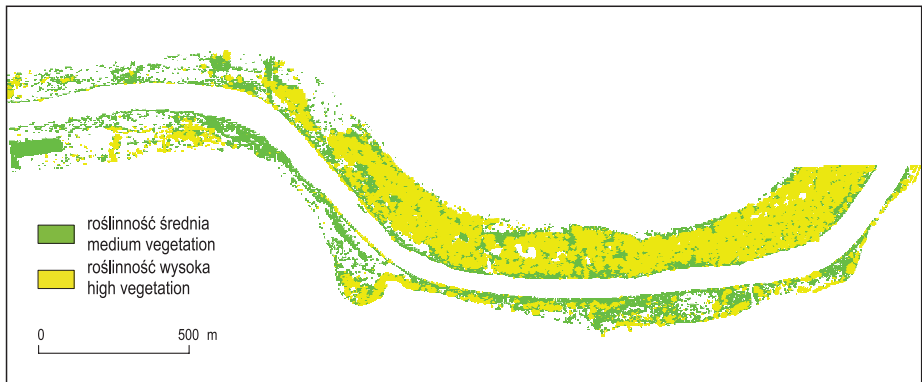


Ryc. 3. Przykład danych ze skaningu laserowego z 2012 r.
Fig. 3. Example of data from 2013



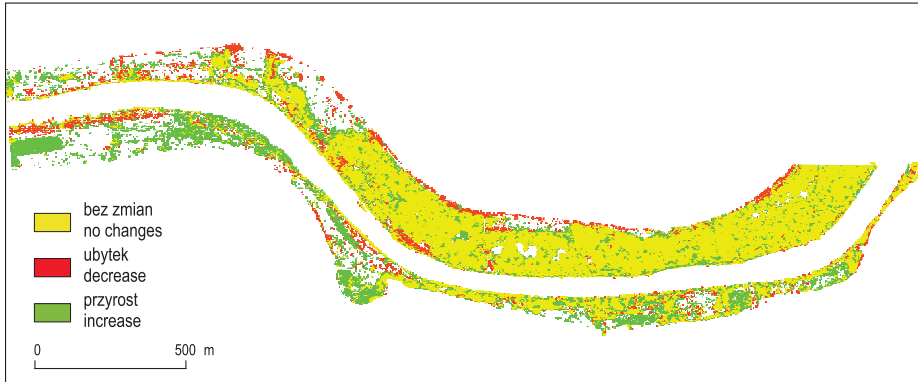
Ryc. 6. Zasięg i struktura pionowa roślinności w 2006 r.

Fig. 6. Vegetation extent and vertical structure in 2006

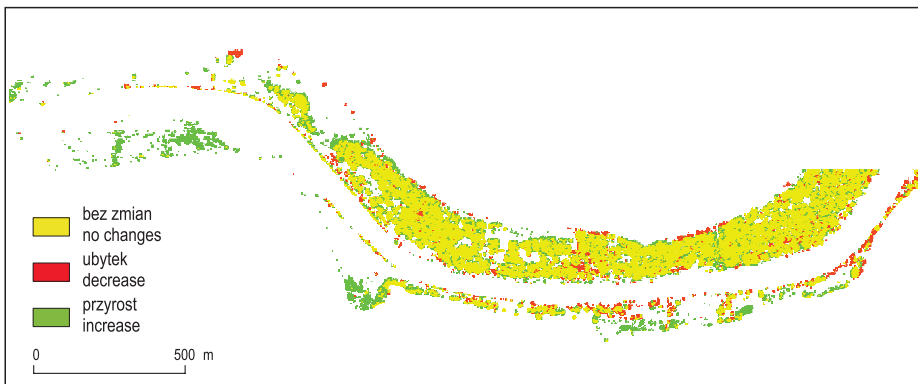


Ryc. 7. Zasięg i struktura pionowa roślinności w 2012 r.

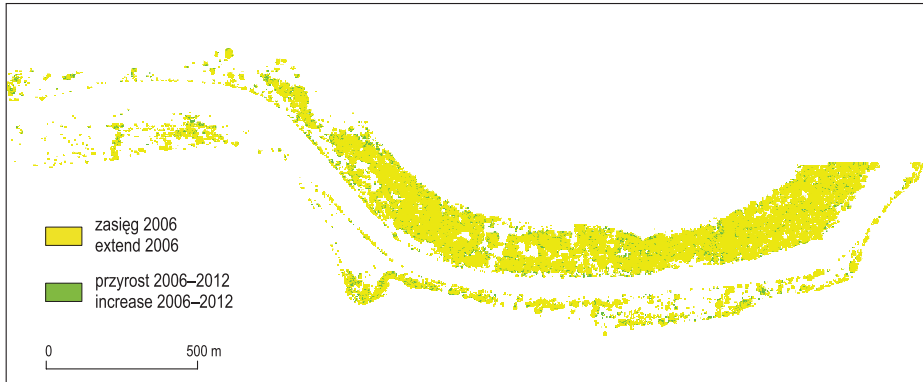
Fig. 7. Vegetation extent and vertical structure in 2012



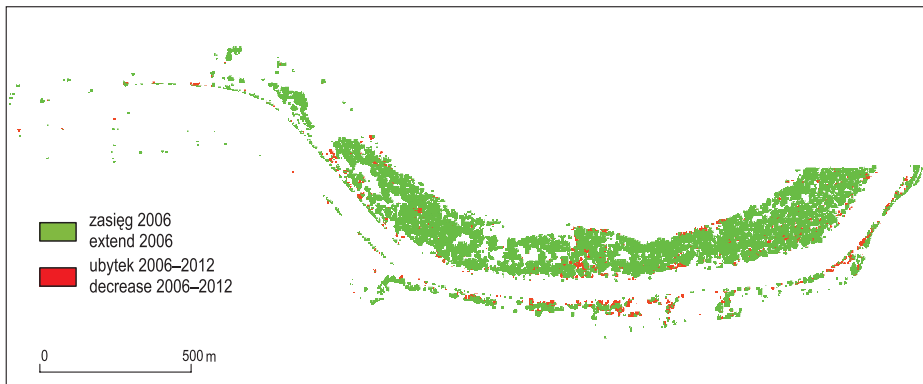
Ryc. 8. Zmiany zasięgu roślinności średniej/ogółem w latach 2006–2012
 Fig. 8. Medium/total vegetation extent changes 2006–2012



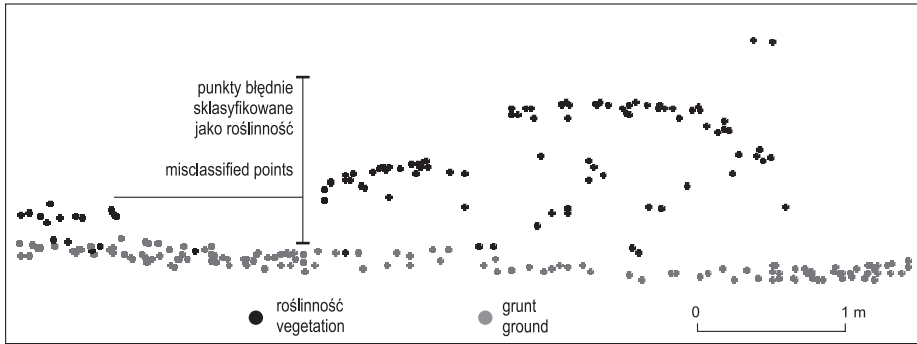
Ryc. 9. Zmiany zasięgu roślinności wysokiej w latach 2006–2012
 Fig. 9. High vegetation extent changes 2006–2012



Ryc. 10. Przyrost roślinności wysokiej w latach 2006–2012 kosztem roślinności średniej
 Fig. 10. High vegetation replacing medium vegetation (2006–2012)



Ryc. 11. Ubytek roślinności wysokiej w latach 2006–2012 na rzecz roślinności średniej
 Fig. 11. High vegetation replaced by medium vegetation (2006–2012)



Ryc. 4. Błędy w oryginalnej klasyfikacji danych z 2012 r. (samochód sklasyfikowany jako roślinność)

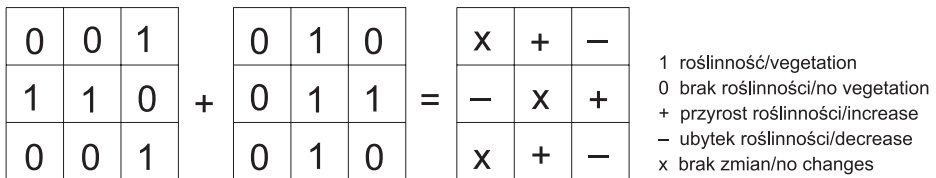
Fig. 4. Errors in the original point classification from 2012 (car classified as vegetation)

Konwersja i analiza zmian

Analizie poddano jedynie roślinność średnią i wysoką. Roślinność jednoroczna, dominująca w klasie roślinności niskiej, została potraktowana jako tło, czego przyczyną są coroczne zmiany, jakim ona podlega. Przetworzone chmury punktów zostały przekonwertowane na format rastrowy w programie ArcMap. Konwersji dokonano osobno dla każdej z klas, bez interpolacji. W wyniku konwersji otrzymano cztery rastry o rozdzielczości 1 m:

- roślinność średnia w 2006 r.,
- roślinność wysoka w 2006 r.,
- roślinność średnia w 2012 r.,
- roślinność wysoka w 2012 r.

Rastry zostały zreklasyfikowane tak, aby wartości otrzymane w dalszych etapach jednoznacznie wskazywały na kierunek zachodzących procesów. Następnie wyko-



Ryc. 5. Schemat analizy zmian

Fig. 5. Change detection schema

rzystując dodawanie map, przeprowadzono analizę zmian (ryc. 5). W rezultacie otrzymano rastry pokazujące strukturę pionową oraz zmiany zasięgu poszczególnych klas roślinności dla roku 2006 i 2012.

Ocena dokładności

Ze względu na brak możliwości weryfikacji wyników w terenie przeprowadzono weryfikację wizualną na danych teledetekcyjnych. W celu oceny dokładności przeprowadzonych analiz wygenerowano 400 losowych punktów, do których automatycznie przypisano klasę roślinności w danym roku określoną na podstawie danych ze skaningu laserowego. Poprawność wyznaczenia tej klasy weryfikowano za pomocą wizualnej interpretacji ortofotomap. W związku z brakiem ortofotomapy zgodnej z chmurą punktów z 2012 r. weryfikacja została w obu przypadkach wykonana na podstawie wizualnej oceny treści kolorowej ortofotomapy wygenerowanej z chmur punktów. Kolory systemu RGB (*red, green, blue*) zostały uzyskane z parametrów intensywności odbicia promieniowania lasera w zakresach widzialnej części promieniowania elektromagnetycznego, odpowiadających barwom czerwonej, zielonej i niebieskiej (*Numeryczne Dane Wysokościowe* 2013).

Wyniki

Zmiany zasięgu

Powierzchnia roślinności średniej i wysokiej w 2006 r. (ryc. 5) wyniosła 41,4 ha, co stanowiło 50% analizowanego obszaru. Roślinność wysoka porastała obszar 25,1 ha – było to 30% analizowanego obszaru i 61% powierzchni porośniętej roślinnością. W 2012 r. powierzchnia roślinności średniej i wysokiej (ryc. 6) wyniosła 50,9 ha, co odpowiadało 61% analizowanego obszaru, roślinność wysoka zaś porastała 30,8 ha (37% obszaru), co stanowiło 61% ogółu analizowanej powierzchni pokrytej roślinnością.

Analiza wykazała zmiany powierzchni porośniętej przez roślinność, dostrzeżono też zmiany w jej strukturze pionowej (ryc. 7, ryc. 8). W latach 2006–2012 na obszarze 7,5 ha odnotowano ubytek powierzchni zajmowanej przez roślinność średnią i wysoką, z czego 3,4 ha stanowiła roślinność wysoka. Przyrost powierzchni zajmowanej przez roślinność średnią i wysoką w analizowanym okresie czasu wyniósł 17,1 ha, w tym roślinności wysokiej 9,1 ha. Na obszarze 33,9 ha porośniętym przez roślinność średnią i wysoką nie odnotowano zmian zasięgu. Dla roślinności wysokiej obszar bez zmian wyniósł 21,7 ha. Dla obszaru, na którym nie odnotowano zmian zasięgu, określono zmiany w strukturze pionowej. Przyrost roślinności wysokiej kosztem

roślinności średniej wyniósł 3,4 ha (ryc. 9), a ubytek roślinności wysokiej na rzecz roślinności średniej wyniósł 2,3 ha (ryc. 10).

Weryfikacja wyników

Wizualna weryfikacja wyników wskazała całkowitą dokładność wyznaczenia klas roślinności na poziomie 88% dla danych z 2006 r. (tab. 1) i 93% dla danych z roku 2012 (tab. 2). Współczynnik *kappa* (Congalton 1991) wyniósł odpowiednio 0,80 i 0,89. Średni błąd niedoszacowania wyniósł 13,8% dla danych z 2006 r. i 7,5% dla danych z 2012 r. Błędy przeszacowania to odpowiednio 15,9% oraz 7,5%.

Dyskusja

Zmiany szaty roślinnej, które zaszły w ciągu sześciu lat dzielących od siebie momenty pozyskania obu zestawów danych, są wyraźnie widoczne. Dostrzega się drzewa wycięte w okresie podlegającym analizie. Tak samo dobrze widoczne są przyrosty drzew i krzewów zarówno ze względu na wysokość, jak i na zajmowaną powierzchnię. Pomimo zabiegów pielęgnacyjnych przeprowadzonych na opisywanym obszarze ogólna powierzchnia roślinności wzrosła.

Z analizy wykluczono roślinność niską (poniżej 0,5 m), do której w zdecydowanej większości zaliczają się gatunki jednoroczne bądź nietrwałe (np. trawy). Jest to metoda stosowana przy niektórych badaniach roślinności (McIntyre i in. 2010), uzasadniona wielosezonowymi obserwacjami własnymi na obszarze badań oraz strukturą gatunkową lasu łęgowego (Kaszyński, Szczukowska 2012). Pozwala ona wyeliminować roślinność, która z roku na rok może zajmować zupełnie inny zasięg, nie wykazując trendu wieloletniego i nie mając przy tym wyraźnego wpływu na roślinność trwałą, taką jak drzewa i krzewy.

Zastosowanie bezpośredniej konwersji chmury punktów do pliku rastrowego (bez zastosowania interpolacji) oraz wysoka rozdzielczość rastrów spowodowały dużą fragmentację poligonów zasięgu. Zastosowanie odpowiednich filtrów pozwoliłoby na zgeneralizowanie obrazu. W pracy nie zastosowano generalizacji ze względu na jej wpływ na dokładność analizy. Dobre rezultaty daje również zastosowanie obiektowej klasyfikacji obrazów (Blaschke i in. 2011). Należy ją niewątpliwie rozważyć jako alternatywę w dalszych badaniach zagadnienia zasięgu roślinności.

Ze względu na brak informacji o dokonywaniu nalotu w ramach projektu ISOK w 2012 r. nie było możliwości kartowania terenu badań dokładnie w tym samym okresie (udostępnienie danych nastąpiło dopiero ponad rok po nalocie). Dla danych z 2006 r. taka możliwość również nie istniała ze względu na zbyt dużą odległość w czasie od momentu podjęcia badań. Nie oznacza to, że etap pracy terenowej został pominięty. Wielokrotnie dokonywano obserwacji i pomiarów roślinności. Wykonano

również zdjęcia w różnych momentach sezonu wegetacyjnego, których celem było porównanie zmian wysokości zachodzących w ciągu jednego sezonu wegetacyjnego oraz wieloletnich zmian związanych głównie z pracami pielęgnacyjnymi.

Z powodu braku ortofotomapy dla 2012 r. oraz niewystarczającej jakości geometrycznej ortofotomapy dla 2006 r. (oryginalnie ortofotomapy są w Krakowskim Układzie Lokalnym, dla którego nie istnieje narzędzie pozwalające na bezpośrednią konwersję rastrów do innego odwzorowania, a ręczne przeliczenia dają niesatysfakcjonującą dokładność), wizualna weryfikacja dokładności była prowadzona na rastrach wygenerowanych ze składowych kolorystycznych RGB chmur punktów. Słabe nasycenie kolorów oraz niski kontrast obrazu dla 2006 r. stanowiły duże utrudnienie w ocenie typu roślinności. Odbiło się to na dokładności weryfikacji, która może być zaniżona przez niedostateczną wyrazistość szczegółów i długie cienie. Obraz uzyskany dla 2012 r. jest zdecydowanie lepszej jakości. Pomimo wyraźnego obrazu wizualna interpretacja i rozróżnienie roślinności niskiej (lub braku roślinności) od średniej stanowiło problem. Spowodowane to było brakiem bezpośredniej informacji o wysokości i podobieństwie struktury roślinności. Również wyróżnienie klasy roślinności wysokiej na podstawie samych tylko zdjęć jest dużo trudniejsze niż na samych danych LiDAR. W związku z przyjętym tylko jednym kryterium – wysokości, rozróżnienie pomiędzy klasami roślinności wydaje się dokładniejsze na podstawie danych ze skaningu laserowego. Klasyfikowanie punktów na podstawie ich wysokości nad poziomem gruntu okazało się problematyczne na brzegu rzeki. Część drzew i krzewów znajduje się nad wodą, przez co nie ma pod nimi gruntu. Są one wtedy klasyfikowane jako roślinność wysoka. Jest to błąd wymagający dokładnej manualnej kontroli klasyfikacji.

Obserwacje i pomiary na obszarze badań nie wykazały znaczących zmian wysokości w ciągu roku, które mogłyby wynikać z obecności bądź braku liści. Mimo to w związku z pozyskaniem zestawów danych w różnych okresach wegetacyjnych część zmian może być pozorna. Liście mogą nieznacznie wpływać na różnice wysokości poszczególnych roślin, a przez to zmieniać ich przynależność do klasy. Niestety w związku z wciąż nielicznymi zestawami kompletnych danych lotniczego skaningu laserowego dla jednego obszaru nie ma obecnie możliwości wyeliminowania tej niepewności.

Pomimo braku liści dane LiDAR pozyskane poza okresem wegetacyjnym dobrze oddają charakter roślinności. W porównaniu z danymi ze szczytu okresu wegetacyjnego pozwalają one nawet na dokładniejszą analizę. Jest to związane z lepszą dostępnością gruntu dla promieni lasera, a co za tym idzie z możliwością wygenerowania dokładniejszego modelu terenu (Stereńczak, Kozak 2011).

Rezultaty otrzymane w wyniku przeprowadzonej analizy jednoznacznie wskazują na wysoką przydatność danych z lotniczego skaningu laserowego do badania zasięgu i struktury pionowej roślinności. Uzyskane dokładności całkowite kształtują się na

poziomie 85–90%. Wartości współczynnika *kappa* są również wysokie (0,80 i 0,89) i mieszczą się w klasach „znacząca” i „doskonała” dokładność (Sim, Wright 2005). Jedyne błędy niedoszacowania i przeszacowania dla klasy roślinności średniej dla 2006 r. mają zdecydowanie wyższe wartości od pozostałych klas (odpowiednio 17,4% i 32,9%). Pomimo tego wyjątku rezultaty uznają za satysfakcjonujące, a ogólny wynik za wskazujący na przydatność metody w praktyce.

Literatura wyraźnie zwraca uwagę na opłacalność wykorzystania danych LiDAR do różnego rodzaju analiz (Borowiecki, Ślusarski 2010; Hummel i in. 2011; Kurczyński 2014). Akcentowane są niskie koszty stosowania tych danych dla dużych obszarów (Borowiecki, Ślusarski 2010) – dla obiektów liniowych, jak w przypadku doliny rzecznej, dla odcinka o długości powyżej 15 km badania za pomocą skaningu laserowego są bardziej opłacalne niż metodami tradycyjnymi (Kurczyński 2014). Wprowadzenie danych ze skaningu oprócz obniżenia kosztów pozwala również na zmniejszenie pracochłonności przy zachowaniu satysfakcjonujących wyników (Hummel i in. 2011). Dodatkowo w przeprowadzonych badaniach wykorzystano możliwość zautomatyzowania większości procesów, co ułatwiło i przyspieszyło analizę. Opracowany model może być zastosowany w innych obszarach badań bez wprowadzania większych zmian.

Podsumowanie

Przeprowadzona analiza zmian zasięgu i struktury roślinności na podstawie danych z lotniczego skaningu laserowego wykazała dużą przydatność tego typu danych do badania przemian roślinności w mikroskali. Szczególnie dużo wartości wnoszą one do określania struktury pionowej zbiorowisk roślinnych, co jest trudne przy wykorzystaniu tylko danych obrazowych, nawet wysokiej rozdzielczości. Mapy wynikowe wyraźnie przedstawiają obszary zmian, np. wycięte drzewa i przyrost powierzchni klas roślinności, a także wysokości poszczególnych drzew i krzewów i ich zmiany. W przypadku posiadania ortofotomapy o dobrej jakości weryfikacja byłaby znacznie dokładniejsza i ułatwiłaby kontrolę klasyfikacji, co niewątpliwie wpłynęłoby dodatnio na jakość finalnej analizy.

Literatura

- Aldred A., Bonnor G., 1985, *Application of airborne lasers to forest surveys*, Petawawa National Forestry Institute, Canadian Forestry Service, Agriculture Canada, Chalk River ON.
- Antonarakis A.S., Richards K.S., Brasington J., 2008, *Object-based land cover classification using airborne LiDAR*, *Remote Sensing of Environment*, 112(6), 2988–2998.
- ArcGIS for Desktop*, <http://www.esri.pl/produkty/arcgis-desktop> (8.12.2013).

- Arroyo L.A., Johansen K., Armston J., Phinn S., 2010, *Integration of LiDAR and QuickBird imagery for mapping riparian biophysical parameters and land cover types in Australian tropical savannas*, *Forest Ecology and Management*, 259(3), 598–606.
- Będkowski K., Mikrut S., 2006, *Skanywanie laserowe jako źródło informacji przestrzennych dotyczących lasów*, *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 16.
- Biuletyn Państwowej Służby Hydrologiczno-Meteorologicznej, listopad 2006*, 2006, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa.
- Biuletyn Państwowej Służby Hydrologiczno-Meteorologicznej, lipiec 2012*, 2012, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa.
- Blaschke T., Johansen K., Tiede D., 2011, *Object-Based Image Analysis for Vegetation Mapping and Monitoring*, [w:] Q. Weng (red.), *Advances in Environmental Remote Sensing: Sensors, Algorithms, and Applications*, Taylor & Francis, London, 241–272.
- Borowiecki I., Ślusarski M., 2010, *Lotniczy skaning laserowy miasta Krakowa (ocena dokładności)*, *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 3, 127–137.
- Brennan R., Webster T.L., 2006, *Object-oriented land cover classification of lidar-derived surfaces*, *Canadian Journal of Remote Sensing*, 32(2), 162–172.
- Cebecauerova M., Kidova A., Lehotsky M., Novotny J., Skubincan P., 2012, *Riparian zone of water streams in Slovakia – global and local aspects of land cover changes and the future trends*, [w:] M. Boltižiar (red.), *The Forum Carpathicum 2012: From Data to Knowledge, from Knowledge to Action*, Institute of Landscape Ecology, Slovak Academy of Sciences, Bratislava, 158–160.
- Congalton R.G., 1991, *A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data*, *Remote Sensing of Environment*, 37, 35–46.
- Fremier A.K., Talley T.S., 2009, *Scaling riparian conservation with river hydrology: Lessons from blue elderberry along four California rivers*, *Wetlands*, 29(1), 150–162.
- Gippel C.J., Finlayson B.L., O'Neill I.C., 1996, *Distribution and hydraulic significance of large woody debris in a lowland Australian river*, *Hydrobiologia*, 318(3), 179–194.
- Gurnell A., 1997, *The hydrological and geomorphological significance of forested floodplains*, *Global Ecology and Biogeography*, 6(3–4), 219–229.
- Heritage G.L., Large A.R.G., 2009, *Principles of 3D laser scanning*, [w:] G.L. Heritage, A.R.G. Large (red.), *Laser Scanning for the Environmental Sciences*, Blackwell Publishing Ltd, Oxford, 21–34.
- Hummel S., Hudak A.T., Uebler E.H., Falkowski M.J., Megown K.A., 2011, *A Comparison of Accuracy and Cost of LiDAR versus Stand Exam Data for Landscape Management on the Malheur National Forest*, *Journal of Forestry*, 109(5), 267–273.
- Hurt G., Xiao X., Keller M., Palace M., Asner G.P., Braswell R., Brondizio E.S., Cardoso M., Carvalho C.J.R., Fearon M.G., Guild L., Hagen S., Hetrick S., Moore B., Nobre C., Read J.M., Sá T., Schloss A., Vourlitis G., Wickel A.J., 2003, *IKONOS imagery for the Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia (LBA)*, *Remote Sensing of Environment*, 88(1–2), 111–127.

- Jędrzychowski I., 2007, *Lotnicze Skanowanie Laserowe Krakowa*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, 17, 339–345.
- Johansen K., Phinn S., Witte C., 2010, *Mapping of riparian zone attributes using discrete return LiDAR, QuickBird and SPOT-5 imagery: Assessing accuracy and costs*, Remote Sensing of Environment, 114(11), 2679–2691.
- Kaszyński B., Szczukowska H., 2012, *Łęgi, polskie lasy deszczowe*, Studia i Materiały Centrum Edukacji Przyrodniczo-Leśnej, 14, 32(3), 104–110.
- Kurczyński Z., 2014, *Lotniczy Skanowanie Laserowe, część 3 z 3*, http://geoforum.pl/?menu=46816,46858,46960&part=2&link=teledetekcja-krotki-wyklad-teledetekcja-lotniczy-skaning-laserowy#page_top (20.03.2014).
- Lefsky M., Cohen W., Parker G., Harding D., 2002, *Lidar Remote Sensing for Ecosystem Studies*, BioScience, 52(1), 19–30.
- Lehotský M., Gresková A., 2004, *Riverine landscape and geomorphology: Ecological implications and river management strategy*, Ekologia, 23, 179–190.
- Lokalny plan ograniczania skutków powodzi i profilaktyki powodziowej*, 2000, Ośrodek Dyspocyjno-Informacyjny Miejskiego Komitetu Przeciwpowodziowego w Krakowie, Kraków.
- McIntyre S., Stol J., Harvey J., Nicholls A.O., Campbell M., Reid A., Manning A.D., Lindenmayer D., 2010, *Biomass and floristic patterns in the ground layer vegetation of box-gum grassy eucalypt woodland in Goorooyarroo and Mulligans Flat Nature Reserves, Australian Capital Territory*, Cunninghamia: A Journal of Plant Ecology for Eastern Australia, 11(3), 287–307.
- Naesset E., 1997, *Estimating Timber Volume of Forest Stands Using Airborne Laser Scanner Data*, Remote Sensing of Environment, 61, 246–253.
- Numeryczne Dane Wysokościowe*, <http://www.codgik.gov.pl/zasob/372-numeryczne-dane-wysokosciowe.html> (8.12.2013).
- Pociask-Karteczka J., 1994, *Przemiany stosunków wodnych na obszarze Krakowa*, Zeszyty Naukowe UJ, Prace Geograficzne, 96, 7–53.
- Projekt ISOK*, <http://www.gugik.gov.pl/projekty/isok> (27.11.2013).
- Omelchuk O., Prots B., Van Bodegom P.M., 2012, *Dispersal of Plant Diaspores along Carpathian River Corridors*, [w:] M. Boltziar (red.), *The Forum Carpathicum 2012: From Data to Knowledge, from Knowledge to Action*, Institute of Landscape Ecology, Slovak Academy of Sciences, Bratislava, 79–81.
- QGIS*, <http://www.quantum-gis.pl/> (8.12.2013).
- Rapidlasso GmbH*, <http://rapidlasso.com/> (8.12.2013).
- Rzepecka A., Czajka B., Mikuś P., Kaczka R. J., Wyźga B., 2012, *Rozwój kępy o złożonej strukturze w zwirodennej rzece górskiej. Wyniki analiz dendrochronologicznych i kartograficznych*, Studia i Materiały CEPL w Rogowie, 14, 1(30), 105–110.
- Stedliska przyrodnicze dolin rzecznych*, http://www.krakow.rzgw.gov.pl/index.php?option=com_content&view=article&id=407%3Asiedliska-przyrodnicze-dolin-rzecznych-&catid=54%3Adlaczego-zmiany&Itemid=302&lang=pl (27.11.2013).

- Sim J., Wright C. C., 2005, *The kappa statistic in reliability studies: Use, interpretation, and sample size requirements*, Physical Therapy, 85(3), 257–68.
- Stereńczak K., Kozak J., 2011, *Evaluation of digital terrain models generated in forest conditions from airborne laser scanning data acquired in two seasons*, Scandinavian Journal of Forest Research, 26, 374–384.
- Stereńczak K., Zasada M., 2011, *Accuracy of tree height estimation based on LIDAR data analysis*, Folia Forestalia Polonica Series A, 53(2), 123–129.
- Tonolli S., Dalponte M., Vescovo L., Rodeghiero M., Bruzzone L., Gianelle D., 2010, *Mapping and modeling forest tree volume using forest inventory and airborne laser scanning*, European Journal of Forest Research, 130(4), 569–577.
- Vauhkonen J., Korpela I., Maltamo M., Tokola T., 2010, *Imputation of single-tree attributes using airborne laser scanning-based height, intensity, and alpha shape metrics*, Remote Sensing of Environment, 114(6), 1263–1276.
- Wężyk P., 2006, *Wprowadzenie do technologii skaningu laserowego w leśnictwie*, Roczniki Geomatyki, 4(4), 119–132.
- Wężyk P., Szostak M., Tompalski P., 2010, *Aktualizacja baz danych SILP oraz Leśnej Mapy Numerycznej w oparciu o dane z lotniczego skaningu laserowego*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, 21, 437–446.
- Wojciechowski W., 2010, *Raport po powodzi z maja i czerwca 2010 r.*, Urząd Miasta Krakowa, Kraków.
- Wyźga B., Radecki-Pawlik A., 2011, *Jak zmniejszyć zagrożenie i ryzyko powodziowe w dorzeczu górnej Wisły?*, Gospodarka Wodna, 10, 414–421.
- Zagrożenia dla bioróżnorodności dolin rzecznych*, http://www.krakow.rzgw.gov.pl/index.php?option=com_content&view=article&id=409%3Azagroenia-dla-bioronrodnoci-dolin-rzecznych-&catid=54%3Adlaczego-zmiany&Itemid=302&lang=pl (27.11.2013).
- Zawiła-Niedźwiecki T., Stereńczak K., Bałazy, R., Wencel A., Strzeliński P., Zasada M., 2008, *LIDAR w leśnictwie*, Teledetekcja Środowiska, 39, 59–66.

Agnieszka Gajda
Uniwersytet Jagielloński
Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej
ul. Gronostajowa 7, 30-387 Kraków
e-mail: agnieszka.gajda@uj.edu.pl